МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62-784.9: 621.91: 674.02 10.23947/1992-5980-2017-17-2-79-87

Формирование силовой последовательности в процессе фрезерной обработки древесины на копировально-фрезерных станках*

А. Н. Чукарин[1], С. В. Голосной[2]**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2]Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Power sequence definition under woodworking milling on contour-milling machines***

A. N. Chukarin[1], S. V. Golosnoy[2]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2]Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Анализ научных работ показывает актуальность данной темы, т. к. не обнаружены публикации, посвященные определению спектральных составляющих силовой последовательности от процесса фрезерования, что затрудняет анализ моделей возбуждения шума и вибрации. Значительную проблему представляет превышение допустимых уровней шума, возникающего из-за высоких частот вращения инструмента. Наиболее высокие частоты вращения отмечены при работе копировально-фрезерных станков. В нормативах режимов резания на обработку древесины задается только амплитуда силового воздействия, что затрудняет определение спектров шума. Данная научная работа посвящена определению параметров силовой последовательности, возникающей при фрезеровании древесины цилиндрическими фрезами.

Материалы и методы. В процессе научных изысканий были использованы методы теории резания, спектрального анализа, статистической обработки. Методы расчета уровней шума и вибрации в значительной степени определяются заданием силового воздействия в функции времени.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования определены и уточнены: закономерности формирования сил при фрезеровании; правила распределения сил по проекциям; закономерности изменения величины срезаемого припуска при фрезеровании.

Обсуждение и заключения. Построенная математическая модель динамики процесса фрезерования и разработанное на ее основе программное обеспечение позволяют оценивать уровни звукового давления, создаваемые как режущим инструментом, так и корпусом шпиндельной бабки. Данное звуковое давление фактически определяет превышение уровней шума над предельно допустимыми значениями.

Ключевые слова: фрезерование, обработка древесины, силовое воздействие.

Introduction. The analysis of the research papers shows the relevance of this topic, since there are no publications devoted to the determination of the spectral components of the power sequence of the milling process which makes it difficult to analyze models of the noise and vibration excitation. The noise exposure limits excess due to the high tool speed presents a critical problem. The highest speed is observed when the copy milling machines are operated. In the cutting conditions standards, only the power action amplitude is specified for woodworking which makes it difficult to determine the noise spectra. This study is devoted to determining parameters of the power sequence arising under the circular moulding.

Materials and Methods. Methods of the cutting theory, spectral analysis, and statistical processing are used in the course of this study. Techniques of the noise and vibration levels analysis are largely determined by specifying the power action as a time function.

Research Results. As a result of the conducted research, the mechanism of the force generation under milling; rules of the forces distribution over the projections; and patterns of variation in the cut-off allowance under milling are determined and specified.

Discussion and Conclusions. The constructed mathematical model of the milling process dynamics and the software developed on its basis make it possible to evaluate the sound pressure levels created by both the cutting tool and the spindle case. This sound pressure actually determines the excess of noise levels over the maximum permissible values.

Keywords: milling, wood processing, power action.

---

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** OPM@rgups.ru nanorcsm@mail.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. Обеспечение требуемых показателей санитарных правил и норм (СанПиН) на этапе проектирования станочного оборудования является перспективным направлением, позволяющим существенно минимизировать расходы на создание и эксплуатацию станков, а также повысить их конкурентоспособность на отечественном и мировом рынках. Одной из необходимых составляющих расчета вибрации и шума, возникающих на станке, является определение возбуждающего силового воздействия на инструмент и деталь, вызывающего колебания. Данная тема наиболее актуальна для копировально-фрезерных деревообрабатывающих станков, частоты вращения шпинделей которых составляют 10 000–18 000 об/мин, что неизбежно приводит к интенсивному звуковому излучению, в особенности для многошпиндельных станков.

Данная работа посвящена определению параметров силовой последовательности, возникающей при фрезеровании древесины цилиндрическими фрезами. Анализ научных работ [1–15] показывает актуальность данной темы. В настоящее время не обнаружены публикации, посвященные определению спектральных составляющих силовой последовательности от процесса фрезерования, что затрудняет анализ моделей возбуждения шума и вибрации. Это определяет научную новизну результатов данного исследования.

1. Представление силовой последовательности как композиции детерминированных и стохастической составляющих. Рассмотрим представление и компоненты силовой последовательности, действующей на инструмент в процессе фрезерования. Они могут быть представлены [16] в виде

$$F(t) = F_0 + F_T(t) + F_n(t), \quad (1)$$

где $F(t)$ — силовая последовательность; F_0 — постоянная составляющая силовой последовательности; $F_T(t)$ — квазипериодическая составляющая силовой последовательности, формируемая процессом обработки; $F_n(t)$ — шумовая составляющая силовой последовательности, формируемая процессом резания.

Величина F_0 определяется, в первую очередь, глубиной срезаемого припуска, режимами резания и конфигурацией инструмента.

Величина $F_T(t)$ может быть представлена в виде ряда

$$F_T(t) = \sum_{k=1}^{n} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (2)$$

в котором для определения ведущей частоты ω используются частота вращения инструмента f и число зубьев фрезы

$$n{:}\omega = 2\pi f n\ . \quad (3)$$

При изменении частоты вращения инструмента ведущая частота смещается, что позволяет оптимизировать вибрацию и шум от станка.

Величина $F_n(t)$ аккумулирует шумовые и нерегулярные силовые воздействия, не учитываемые в предыдущих компонентах. Непериодические составляющие шумовой последовательности возникают как реакция инструмента на различные неоднородности в обрабатываемом материале и характеризуются широким непрерывным спектром с повышением в высокочастотной области.

С точки зрения достижения цели исследования — минимизации уровней шума и вибрации на этапе проектирования оборудования, наибольший интерес представляет анализ закономерностей формирования квазипериодической составляющей $F_T(t)$, т. к. именно она оказывает наибольшее влияние на формирование шума и вибрации и при этом наиболее управляема с точки зрения назначения режимов обработки и выбора инструмента.

Рассмотрим, каким образом происходит формирование $F_T(t)$ для случая обработки цилиндрической фрезой с прямыми и косыми зубьями.

2. Формирование силовой последовательности из сил, действующих на элементы фрезы. Рассматривая модельные силовые последовательности типа

$$\hat{F}(t) = F_0 + F_T(t), \quad (4)$$

не содержащие шумовой составляющей и полученные для элементарного диска фрезы, удобно перейти от векторного рассмотрения к скалярному, используя разложение на компоненты в трехмерном базисе, связанном с фрезой (рис. 1).

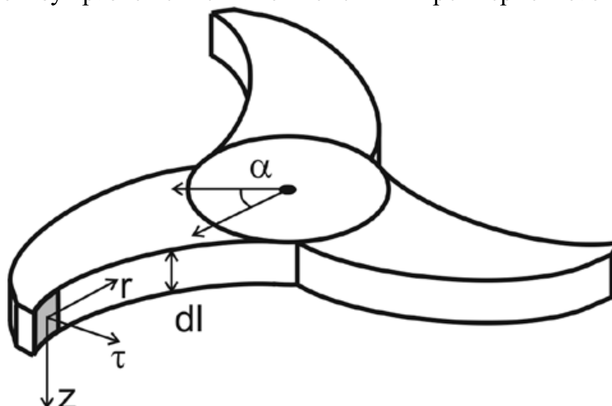


Рис. 1. Базис для разложения силового воздействия на элементарный диск фрезы

Fig. 1. Basis for power action resolution on the elementary cutter disk

При этом также удобно перейти от временного представления сил к рассмотрению их зависимости от угла поворота режущего зуба:

$$F_r(\alpha) = F_D \cdot \cos(\varpi)\cos(\gamma) + F_f \cdot \sin(\gamma)\cos(\varpi),$$
$$F_\tau(\alpha) = -F_D \cdot \cos(\varpi)\sin(\gamma) + F_f \cdot \cos(\gamma)\cos(\varpi) \quad ,(5)$$
$$F_z(\alpha) = -F_D \cdot \sin(\varpi) + F_f \cdot \sin(\varpi),$$

где γ — передний угол заточки зуба фрезы; ϖ — угол винтовой линии фрезы; F_D — нормальная к передней поверхности зуба составляющая силы резания; F_f — сила трения стружки по передней поверхности зуба.

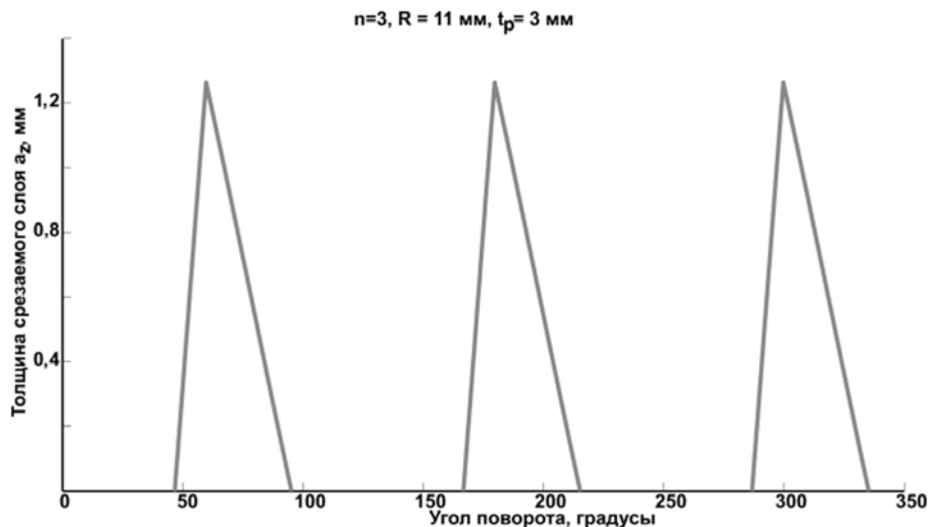
Величина силы резания F_P есть векторная сумма сил F_D и F_f. При этом ее модуль равен

$$|F_P| = \sqrt{|F_D|^2 + \left|F_f\right|^2} = \sqrt{|F_D|^2 + \left|k_f F_D\right|^2} = |F_D|\sqrt{1 + k_f^2}, \quad (6)$$

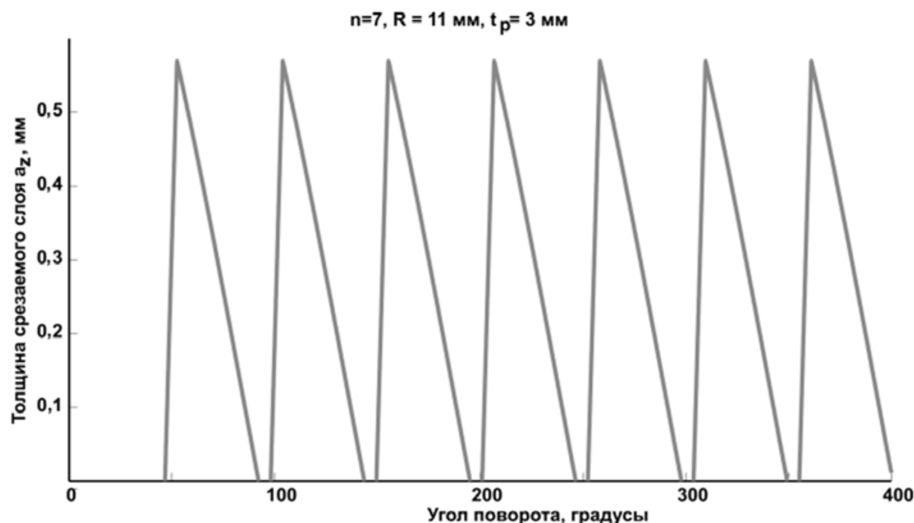
где k_f — коэффициент трения стружки по передней поверхности зуба.

Покажем, как формируется силовое воздействие на инструмент и заготовку в целом. Силовые воздействия на элемент фрезы складываются с учетом их векторной ориентации. В результате будет получена последовательность детерминированного воздействия, включающая в себя постоянную и периодическую составляющие.

На рис. 2 приведены последовательности площади срезаемого слоя α_z при фрезеровании трех-, пяти- и семизубой фрезой диаметром 11 мм при разной величине срезаемого припуска (3 и 9 мм). Видно, что при увеличении числа зубьев или величины срезаемого припуска в определенный момент начинается одновременное резание более чем одним зубом. То есть при расчете величины формируемой силовой последовательности необходимо учитывать силы от одновременно срезаемого разными зубьями припуска.



a)



b)

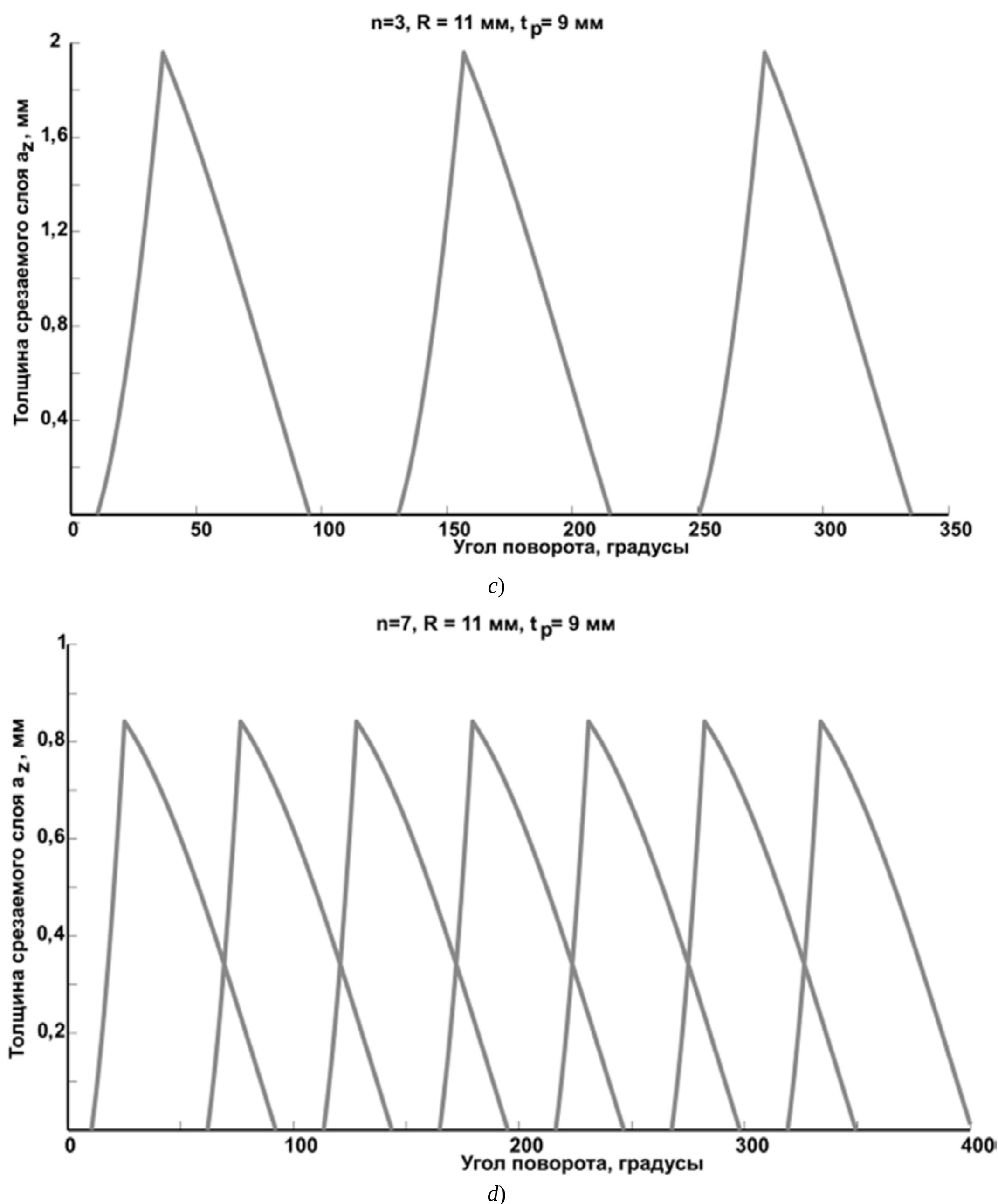
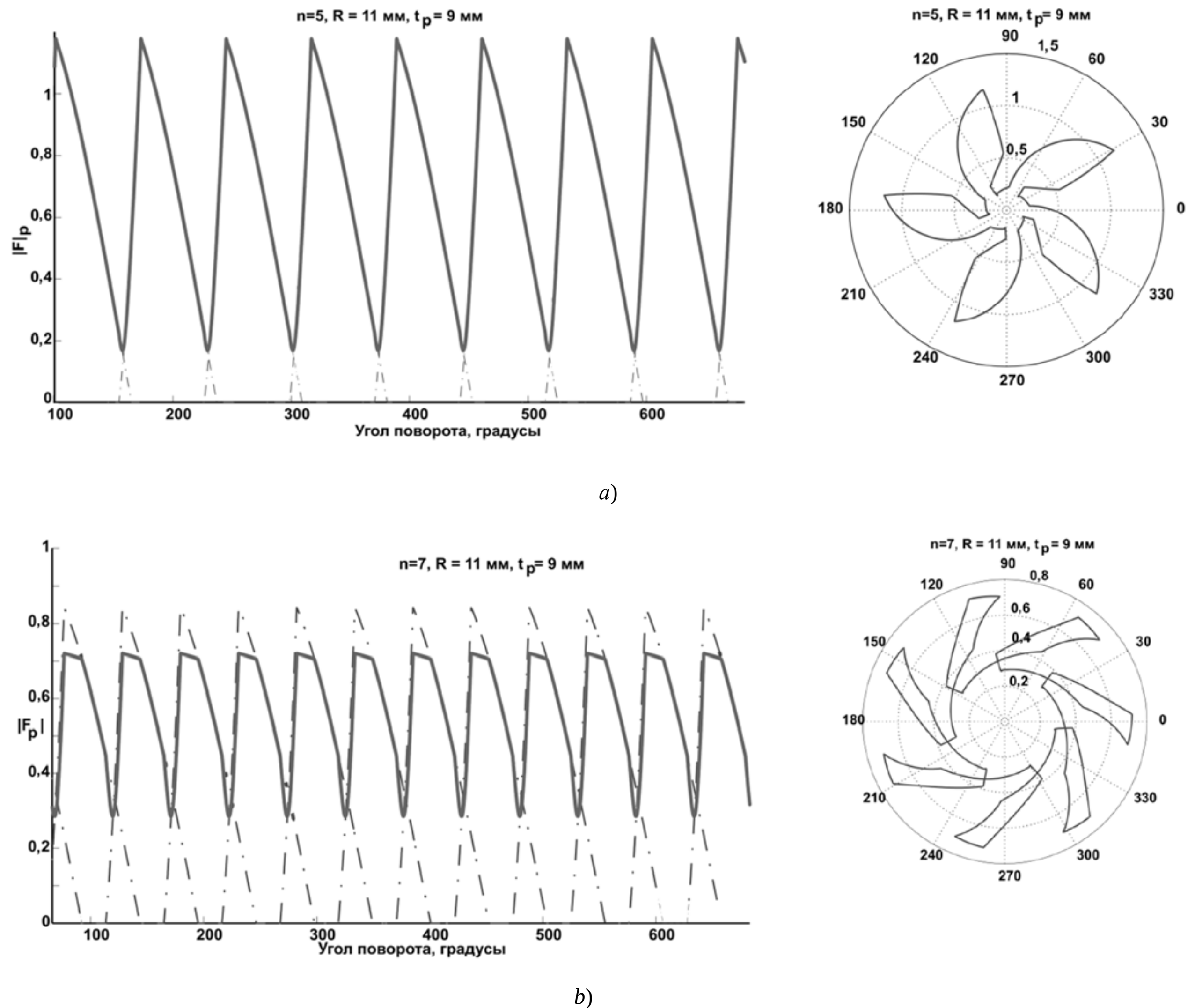


Рис. 2. Площади срезаемого слоя α_z для фрез диаметром 11 мм с различным числом зубьев и различной толщиной срезаемого припуска: *n* = 3, *R* = 11 мм, t_p = 3 мм (*a*); *n* = 7, *R* = 11 мм, t_p = 3 мм (*b*); *n* = 3, *R* = 11 мм, t_p = 9 мм (*c*); *n* = 7, *R* = 11 мм, t_p = 9 мм (*d*)

Fig. 2. Area of cut-off layer α_z for mills with diameter of 11 mm with various number of teeth and various thicknesses of cut-off allowance: *n* = 3, *R* = 11 mm, t_p = 3 mm (*a*); *n* = 7, *R* = 11 mm, t_p = 3 mm (*b*); *n* = 3, *R* = 11 mm, t_p = 9 mm (*c*); *n* = 7, *R* = 11 mm, t_p = 9 mm (*d*)

Следует учесть тот факт, что скалярное сложение величины припуска от разных зубьев не даст верного результата, надо отдельно вычислять векторы сил резания от каждого из зубьев, а затем их складывать с учетом ориентации векторов. При этом силовое воздействие на инструмент целесообразно разделить на радиальное, приложенное к оси инструмента, и тангенциальное, формирующее момент сил сопротивления вращению, как это сделано в (5). Для прямозубой фрезы $F_z = 0$.

Приведем расчет для *n* = 5 и двух значений срезаемого припуска (рис. 3).



b)

Рис. 3. Модули и углы смещения вектора суммарной силы резания для фрез диаметром 11 мм с различным числом зубьев и различной толщиной срезаемого припуска: n = 5, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*a*); n = 7, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*b*)

Fig. 3. Modules and displacement angles of the total cutting force vector for mills with diameter of 11 mm with various number of teeth and various thicknesses of cut-off allowance: n = 5, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*a*); n = 7, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*b*)

Угловое расстояние между зубьями фрезы φ = 72°. Эта же величина составляет угол между векторами сил резания от последовательных зубьев, если фреза начинает резать несколькими зубьями.

Модуль суммарной силы $\overrightarrow{F_{P,\Sigma}}$ определяется как

$$\left|\overrightarrow{F_{P,\Sigma}}\right| = \sqrt{\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|^2 + \left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|^2 - 2\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|\cos(\varphi)}. \qquad (7)$$

Угол ориентации вектора суммарной силы резания может быть найден из треугольника, образуемого суммируемыми и результирующим векторами:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|}{\left|\overrightarrow{F_{P,\Sigma}}\right|}\sin(\varphi)\right) = \arcsin\left(\frac{\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|}{\sqrt{\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|^2+\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|^2-2\left|\overrightarrow{F_{P,1}}\right|\left|\overrightarrow{F_{P,2}}\right|\cos(\varphi)}}\sin(\varphi)\right). \qquad (8)$$

Для дальнейшего анализа силовых последовательностей разделим последовательности модуля сил резания, приведенные на рис. 3, на постоянную и периодическую составляющие. В табл. 1 приведены величины постоянной составляющей (верхнее значение) и амплитуды периодической составляющей (нижнее значение) для нескольких значений условий обработки.

Таблица 1

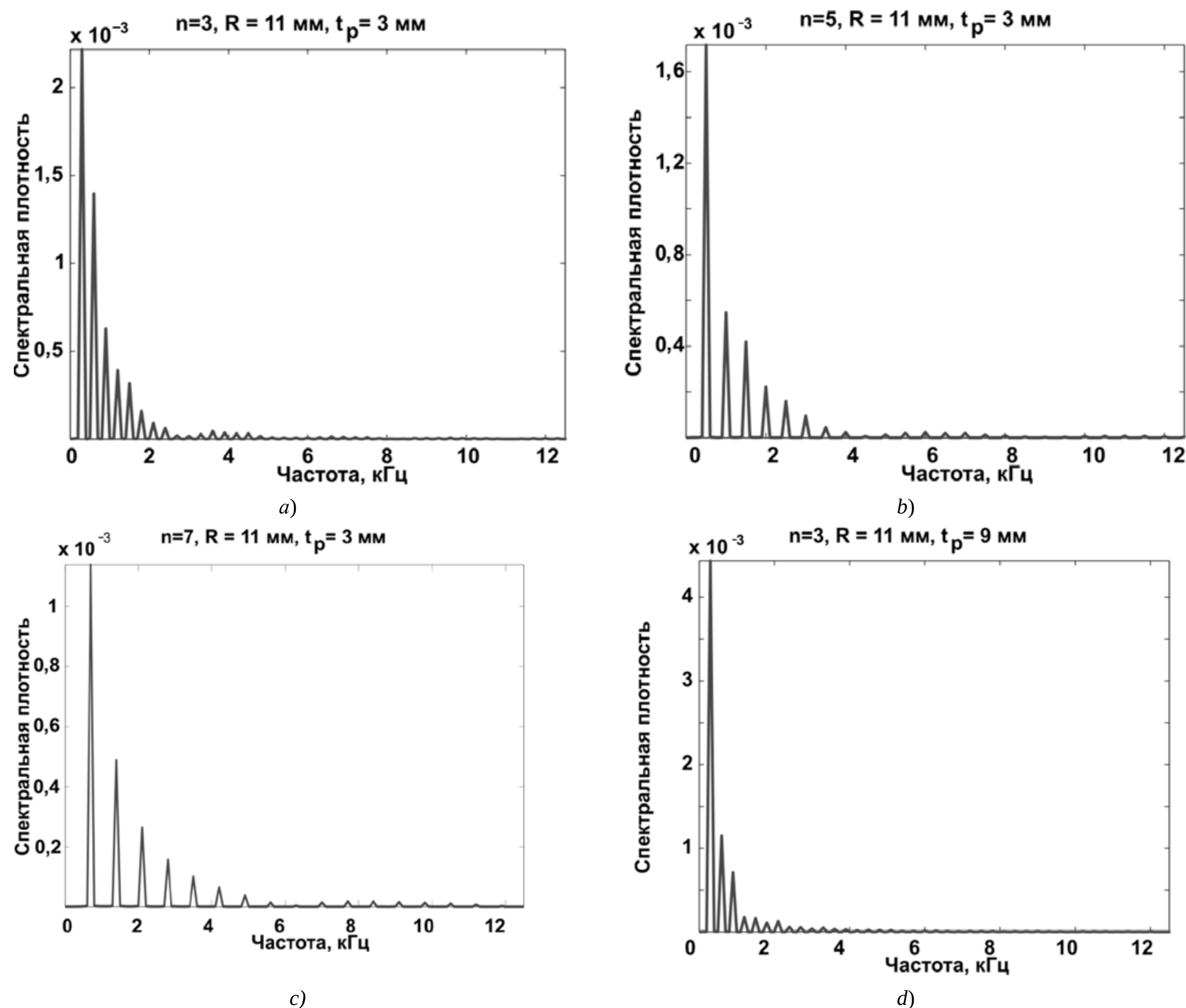
Table 1

Величина постоянной и переменной составляющих модуля силы резания

Magnitude of constant and variable components of the cutting force modulus

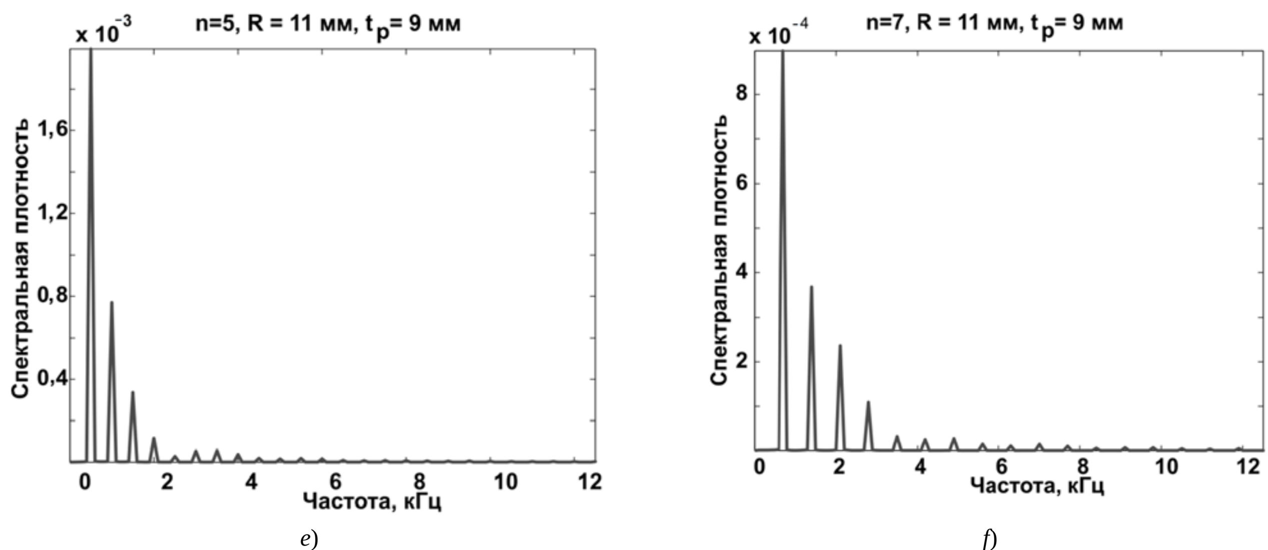
		Площадь срезаемого слоя, t_p, мм		
		3	5	9
Число зубьев фрезы, n	3	0,0	0,0	0,0
		1,26	1,61	1,96
	5	0,0	0,0	0,17
		0,79	0,98	1,01
	7	0,0	0,08	0,29
		0,57	0,62	0,43

При анализе частотных характеристик формируемых при фрезеровании силовых последовательностей следует учитывать тот факт, что увеличение числа зубьев фрезы при той же частоте вращения приводит к смещению ведущей частоты в высокочастотную область. Результаты расчета спектральной плотности представлены на рис. 4.



a) *b*)

c) *d*)



e) *f*)

Рис. 4. Спектр силовой последовательности для фрез диаметром 11 мм с различным числом зубьев и различной толщиной срезаемого припуска. Частота вращения фрезы 6000 об/мин: n = 3, R = 11 мм, t_p = 3 мм (*a*); n = 5, R = 11 мм, t_p = 3 мм (*b*); n = 7, R = 11 мм, t_p = 3 мм (*c*); n = 3, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*d*); n = 5, R = 11 мм, t_p = 3 мм (*e*); n = 7, R = 11 мм, t_p = 9 мм (*f*)

Fig. 4. Spectrum of power sequence for mills with diameter of 11 mm with various number of teeth and various thicknesses of cut-off allowance. Rotation frequency of the milling cutter is 6000 rpm: n = 3, R = 11 mm, t_p = 3 mm (*a*); n = 5, R = 11 mm, t_p = 3 mm (*b*); n = 7, R = 11 mm, t_p = 3 mm (*c*); n = 3, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*d*); n = 5, R = 11 mm, t_p = 3 mm (*e*); n = 7, R = 11 mm, t_p = 9 mm (*f*)

Определяя в дальнейшем спектральную мощность случайной последовательности в регламентируемых частотных диапазонах, можно оценить величины вибрации и шума.

Заключение. На основе представленных выше результатов можно утверждать, что все декларированные при проведении исследования задачи решены. Определены закономерности формирования сил при фрезеровании, правила распределения их по проекциям, закономерности изменения величины срезаемого припуска. Построенная математическая модель динамики процесса фрезерования и разработанное на ее основе программное обеспечение позволяет оценивать показатели макрогеометрии обрабатываемых концевыми фрезами поверхностей.

Библиографический список

1 Новоселов, В. Г. Экспериментальное исследование изменения шероховатости обработанной поверхности в процессе фрезерования древесины / В. Г. Новоселов, И. Т. Рогожникова // Лесной журнал. — 2011. — № 6. — С. 70–75. — (Известия высших учебных заведений).

2 Батуев, В. В. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск / В. В. Батуев // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. — 2006. — № 3. — С. 119–123.

3 Хайдер, А. М. Исследование и разработка процесса фрезерования декоративных элементов мебели на станках с ЧПУ / А. М. Хайдер, В. С. Петровский, А. А. Грибанов // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. — 2012. — № 2. — С. 53–56.

4 Козлов, А. М. Методика подбора оптимальных режимов обработки для минимизации виброскорости при фрезеровании / А. М. Козлов, Е. В. Кирющенко // Современные фундаментальные и прикладные исследования. — 2012. — № 1–4. — С. 32–38.

5 Богачев, А. Н. Нагрузка, действующая на консоль ротора при фрезеровании / А. Н. Богачев, С. Н. Мухина // Вологдинские чтения. — 2010. — № 78. — С. 98–100.

6 Цаплин, П. В. Анализ стружкообразования при фрезеровании композиционных плит двухподвижной винтовой фрезой / П. В. Цаплин, А. Г. Ермолович, В. А. Меновщиков // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2010. — № 1. — С. 129–132.

7 Свинин, В. М. Управление регенеративными автоколебаниями при фрезеровании на основе модуляции скорости резания : автореф. дис. … д-ра тех. наук / В. М. Свинин. — Иркутск, 2008. — 229 с.

8 Zakovorotny, V. L. Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts / V. L. Zakovorotny, A. A. Gubanova, A. D. Lukyanov // Russian Engineering Research. — 2016. — Vol. 36, № 11. — P. 956–964.

9 Zakovorotny, V. L. Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine / V. L. Zakovorotny, A. A. Gubanova, A. D. Lukyanov // Russian Engineering Research. — 2016. — Vol. 36, № 12. — P. 1033–1039.

10 Заковоротный, В. Л. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 4. — С. 32–40.

11 Заковоротный, В. Л. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 6. — С. 10–16.

12 Заковоротный, В. Л. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // СТИН. — 2016. — № 8. — С. 27–33.

13 Заковоротный, В. Л. Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай малой скорости резания) / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 1 (84). — С. 52–66.

14 Заковоротный, В. Л. Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай большой скорости резания) / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, А. Д. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2016. — Т. 16, № 2 (85). — С. 32–42.

15 Козлов, А. М. Повышение производительности фрезерования вогнутых поверхностей сложной формы на станках с ЧПУ / А. М. Козлов, Г. Е. Малютин // Вестник машиностроения. — 2014. — № 12. — С. 71–75.

References

1 Novoselov, V.G., Rogozhnikova, I.T. Eksperimental'noe issledovanie izmeneniya sherokhovatosti obrabotannoy poverkhnosti v protsesse frezerovaniya drevesiny. [Experimental investigation of wood surface roughness variation during milling.] Forestry Journal, 2011, no. 6, pp. 70–75 (in Russian).

2 Batuev, V.V. Raschet tolshchiny srezaemogo sloya pri frezerovanii prostranstvenno-slozhnykh poverkhnostey, imeyushchikh stupenchatyy pripusk. [Calculation of cut-off layer thickness under milling spatially complex surfaces with stepped allowance.] Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo tsentra UrO RAS, 2006, no. 3, pp. 119–123 (in Russian).

3 Haider, A. M., Petrovsky, V.S., Gribanov, A.A. Issledovanie i razrabotka protsessa frezerovaniya dekorativnykh elementov mebeli na stankakh s ChPU. [Research and development of process of milling of decorative elements of furniture on machines with CNC.] FES: Finance. Economy. Strategy. 2012, no. 2, pp. 53–56 (in Russian).

4 Kozlov, A.M., Kiryushcenko, E.V. Metodika podbora optimal'nykh rezhimov obrabotki dlya minimizatsii vibroskorosti pri frezerovanii. [The method of optimal cutting modes calculation to minimize vibration for milling process.] Modern Fundamental and Applied Researches, 2012, no. 1 (4), pp. 32–38 (in Russian).

5 Bogachev, A. N., Mukhina, S.N. Nagruzka, deystvuyushchaya na konsol' rotora pri frezerovanii. [Load acting on the rotor console during milling.] Vologdinskie chteniya, 2010, no. 78, pp. 98–100 (in Russian).

6 Tsaplin, P.V., Yermolovich, A.G., Menovshchikov, V.A. Analiz struzhkoobrazovaniya pri frezerovanii kompozitsionnykh plit dvukhpodvizhnoy vintovoy frezoy. [Analysis of chip formation during milling composite slabs by a double-screw screw mill.] The Bulletin of KrasGAU, 2010, no. 1, pp. 129–132 (in Russian).

7 Svinin, V.M. Upravlenie regenerativnymi avtokolebaniyami pri frezerovanii na osnove modulyatsii skorosti rezaniya: avtoref. dis. … d-ra tekh. Nauk. [Regenerative auto-oscillation control during milling based on modulation of cutting speed: Dr.Sci. (Eng.) diss., author’s abstract.] Irkutsk, 2008, 229 p. (in Russian).

8 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Stability of Shaping Trajectories in Milling: Synergetic Concepts. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 11, pp. 956–964.

9 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Parametric Self-Excitation of a Dynamic End-Milling Machine. Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, no. 12, pp. 1033–1039.

10 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Ispol'zovanie sinergeticheskoy kontseptsii dlya izucheniya ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya. [Use of synergetic concept for studying stability of forming trajectories of climb cutting.] STIN, 2016, no. 4, pp. 32–40 (in Russian).

11 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Usloviya parametricheskogo samovozbuzhdeniya dinamicheskoy sistemy frezerovaniya kontsevymi frezami. [Conditions for parametric self-excitation of dynamic end milling system.] STIN, 2016, no. 6, pp. 10–16 (in Russian).

12 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevymi frezami. [Attracting sets under end milling.] STIN, 2016, no. 8, pp. 27–33 (in Russian).

13 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Sinergeticheskiy podkhod pri izuchenii ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya bokovymi granyami kontsevykh frez (sluchay maloy skorosti rezaniya). [Synergetic approach to studying stability of form-building trajectories of climb milling by side edges of endmills (low cutting speed case).] Vestnik of DSTU, 2016, no. 1 (85), pp. 50–62 (in Russian).

14 Zakovorotny, V.L., Gubanova, A.A., Lukyanov, A.D. Sinergeticheskiy podkhod pri izuchenii ustoychivosti formoobrazuyushchikh traektoriy poputnogo frezerovaniya bokovymi granyami kontsevykh frez (sluchay bol'shoy skorosti rezaniya.) [Synergetic approach to study forming path stability of the end cutdown milling by side faces (case of high speed cutting).] Vestnik of DSTU, 2016, no. 2 (85), pp. 32–42 (in Russian).

15 Kozlov, A.M., Malyutin, G.E. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniya vognutykh poverkhnostey slozhnoy formy na stankakh s ChPU. [Capability improvement of finishing milling of concave surfaces of complicated shape on NC machines.] Vestnik Mashinostroeniya, 2014, no. 12, pp. 71–75 (in Russian).

Поступила в редакцию 15.01.2017
Сдана в редакцию 15.01.2017
Запланирована в номер 05.04.2017

Received 15.01.2017
Submitted 15.01.2017
Scheduled in the issue 05.04.2017

Об авторах:

Чукарин Александр Николаевич,
главный научный сотрудник Управления научных исследований Донского государственного технического университета (РФ, 344000, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), Доктор технических наук, профессор,
ORCID:http://orcid.org/0000-0002-1779-720X
OPM@rgups.ru

Голосной Сергей Владимирович,
аспирант Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2),
ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7717-8913
nanorcsm@mail.ru

Authors:

Chukarin, Alexander N.,
Senior Research Scholar of the Scientific Research Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1779-720X
OPM@rgups.ru

Golosnoy, Sergey V.,
postgraduate student, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2),
ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7717-8913
nanorcsm@mail.ru